

---

(21) Application number: 09273557

(51) Int Cl.: G01N01116, G01N00900, H01L04108

(22) Date of filing: 19970919

---

(54) TUNING FORK-TYPE PIEZOELECTRIC VIBRATOR

---

(72) Inventor(s): SUZUKI HAJIME  
MORONUKI MASAKI

(73) Assignee(s): RIKEN CORP

---

(57) **PROBLEM TO BE SOLVED:** To simultaneously measure physical property values of a viscosity and a density of a liquid highly accurately with the use of a tuning fork vibrator, by separating a vibrating part to a fixed part and a main body part via a slit extending in a sectional direction and bonding a piezoelectric body to the main body part.

**SOLUTION:** Two vibrating parts 12 are coupled at a base part 11, thereby forming a tuning fork vibrator of a U-shaped cross section. Two slits 13 are cut in each vibrating part 12 at both sides in a breadthwise direction to extend in a sectional direction. A main body part 16 and two fixed parts 18 are integrally formed. Piezoelectric bodies 14, 15 are bonded to the vicinity of the base part 11 of the main body part 16. Only the main body part 16 vibrates. A liquid enters also the slits 13, and therefore a viscous resistance of the liquid acts to the main body part 16 by the fixed parts 18. A size of the viscous resistance is proportional to a velocity gradient of the liquid in touch with a vibrating face. A constant of the proportion becomes a viscosity of the liquid. A sensor that can measure a viscosity and a density of a liquid at the same time is obtained with the use of a system detecting a vibration frequency and an effective value of a secondary output voltage of the tuning fork vibrator.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-94726

(43) 公開日 平成11年(1999) 4月9日

(51) Int.Cl.<sup>8</sup>

識別記号

F I

G 0 1 N 11/16

G 0 1 N 11/16

B

9/00

9/00

E

H 0 1 L 41/08

H 0 1 L 41/08

Z

審査請求 未請求 請求項の数 6 F D (全 6 頁)

(21) 出願番号

特願平9-273557

(22) 出願日

平成9年(1997) 9月19日

(71) 出願人 000139023

株式会社リケン

東京都千代田区九段北1丁目13番5号

(72) 発明者 鈴木 一

埼玉県熊谷市末広四丁目14番1号 株式会

社リケン熊谷事業所内

(72) 発明者 諸賀 正樹

埼玉県熊谷市末広四丁目14番1号 株式会

社リケン熊谷事業所内

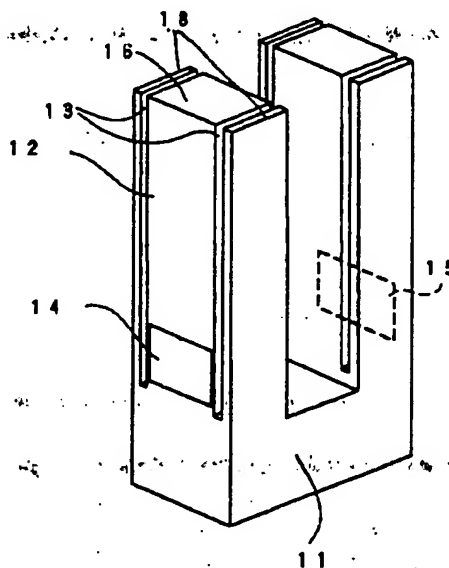
(74) 代理人 弁理士 土屋 勝

(54) 【発明の名称】 音叉型圧電振動子

(57) 【要約】

【課題】 音叉型振動子を用いた粘度計及び密度計の精度を向上させる。

【解決手段】 基部11で結合された一対の振動部12を備えた断面U字状の音叉型圧電振動子において、前記振動部が断面方向に延長したスリット13により分離された固定部18及び本体部18を含み、前記固定部及び前記本体部を一体形成し、各本体部に圧電体14、15を接着する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】基部で結合された一対の振動部を備えた断面U字状の音叉型圧電振動子において、

前記振動部は、断面方向に延長したスリットにより分離された固定部及び本体部を含み、前記固定部及び前記本体部が一体形成され、各本体部に圧電体が接着されたことを特徴とする音叉型圧電振動子。

【請求項2】前記スリットの深さは、液体粘性浸入深さの略1〜10倍である請求項1に記載の音叉型圧電振動子。

【請求項3】前記圧電体の幅が前記本体部の奥行きに等しい請求項1又は2に記載の音叉型圧電振動子。

【請求項4】前記固定部の厚さが1mm以上である請求項1又は2に記載の音叉型圧電振動子。

【請求項5】前記圧電体は、チタン酸ジルコン酸鉛又はチタン酸バリウムから形成される請求項1〜4のいずれかに記載の音叉型圧電振動子。

【請求項6】前記振動部は、鉄、コバルト、ニッケル、クロム、モリブデンからなる群から選択される合金である請求項1〜5のいずれかに記載の音叉型圧電振動子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、液体の粘度及び密度を同時に計測することができる液体性状センサとして利用できる音叉型圧電振動子に関する。

## 【0002】

【従来の技術】昨今、多くの分野で産業システムの自動化が進んでいる。自動運転の正確性、安全性及び最適化のためには、リアルタイムで様々な物性値の計測が必要となり、このための種々の液体性状センサの重要性が益々高まっている。

【0003】この中でも、水晶振動子を用いた発振型の粘度センサは、近年小型で高精度な液体性状センサとして開発され、また「粘度測定装置」(特開昭64-47932号公報)に開示されている。

【0004】この粘度測定装置は、発振周波数が粘度及び密度の積の平方根に比例するという特性から、粘度及び密度の乗算値のみを測定していた。従って、粘度或は密度の一方の値が既知である場合にのみ、他方の値が特定されるという測定上の制約があった。

【0005】一方、図1は、従来の音叉振動子を用いた液体性状センサの概略斜視図である。図において、振動部12は、下部に圧電体14が接着されて、圧電体14に外部電圧が印加されて振動部12が振動される。この音叉センサは、振動周波数 $f$ と、二次側出力電圧の実効値 $V$ に関して、液体の粘度 $\eta$ と密度 $\rho$ との間に以下の(1)及び(2)式のような出力特性を有している。

$$f = a \eta^h \rho^i + b \quad \dots (1)$$

$$V = c \eta^j \rho^k + d \quad \dots (2)$$

【0006】ここで、(1)式の粘度指数 $h$ は、密度指数 $i$ に比較して著しく小さく、具体的に $h \sim 1$ 、 $i \sim 0$ であった。(2)式においては、粘度指数 $j$ 及び密度指数 $k$ が同程度であり、 $j \sim k \sim 0.5$ であった。従って、(1)式では、 $f$ が略 $\rho$ と比例関係にあり、また比例定数 $a$ の値も密度の測定精度を得る上で十分に大きな値であることから、密度に関してはかなり正確な測定値が得られた。

## 【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、粘度については、 $f$ に関する粘度指数 $h$ の値が非常に小さいことや、(2)式における粘度指数 $j$ の大きさが密度指数 $k$ に比べて同程度の大きさであることと、比例定数 $c$ の大きさが粘度の測定精度を得る上で十分に大きくないことから、検出値が多くバラツキを含み、粘度測定精度がやや劣るという欠点を有していた。

【0008】本発明は、音叉振動子を用いた小型で安価なセンサ素子にして、液体の粘度及び密度の物性値が同時に高精度で測定できる粘度・密度センサを提供することを目的とする。

## 【0009】

【課題を解決するための手段】本発明によれば、基部で結合された一対の振動部を備えた断面U字状の音叉型圧電振動子において、前記振動部は、断面方向に延長したスリットにより分離された固定部及び本体部を含み、前記固定部及び前記本体部が一体形成され、各本体部に圧電体が接着されたことを特徴とする。

【0010】前記スリットの深さは液体粘性浸入深さの略1〜10倍であり、前記圧電体の幅が前記本体部の奥行きに等しく、或いは前記固定部の厚さが1mm以上である。また、前記圧電体は、チタン酸ジルコン酸鉛又はチタン酸バリウムから形成され、前記振動部は、鉄、コバルト、ニッケル、クロム、モリブデンからなる群から選択される合金である。

## 【0011】

【実施例】以下に図面を参照して本発明の一実施例を説明する。

【0012】音叉振動子の(1)及び(2)の特性方程式を用いて粘度及び密度測定を行う場合において、粘度測定値に関するバラツキを少なくするためには、 $f$ 或は $V$ の粘度感度を高めることが重要になる。即ち、(1)及び(2)式の各数値に関しては、定数 $a$ 、 $c$ の値は大きい方がよく、粘度指数 $h$ 、 $j$ の値は密度指数 $i$ 、 $k$ に比較して大きくすることが重要である。

【0013】音叉振動子が液体中で振動する場合には、液体の粘度や密度が振動に対する抵抗を生じて、上記の(1)及び(2)式の $f$ 、 $V$ を低下させる。この低下の度合いが粘度、密度に対する感度ということになるのであるから、粘度精度を向上させてその結果として粘度感度を増加させるためには、音叉振動子が液体の粘性抵抗を

多く受けるような構造にすることが重要となる。

【0014】本発明では、音叉振動子に生じる液体からの粘性抵抗を、振動部分の両側に、振動方向と平行なスリットを形成することで増加させている。

【0015】図2は、本発明による音叉振動子の概略斜視図である。この図において、図1に対応する部材には同一の符号が付してある。図において、2つの振動部12が基部11で結合されて、断面U字状の音叉振動子を形成している。各振動部12には、奥行方向の両側に、各々が断面方向に延長した2つのスリット13が切削されて、本体部16と2つの固定部18が一体形成される。圧電体14はこのスリット13で挟まれた本体部16の基部11近傍に位置して、本体部16のみが振動する。

【0016】液体は、スリット13内にも侵入し、本体部16が固定部18によって液体の粘性抵抗を受ける。この粘性抵抗の大きさは以下に述べるように振動面に接する液体の速度勾配に比例し、比例定数が液体の粘度になる。

$$F = A \cdot \eta \cdot (dV/dz)$$

【0017】ここで、Fは振動面の受ける粘性抵抗であり、Aは振動面の面積、 $\eta$ は液体の粘度、 $dV/dz$ は振動面に接する液体の速度勾配であり、zは振動面からの距離である。上式において、粘度 $\eta$ が等しい同一液体の場合には、振動面の面積Aあるいは速度勾配( $dV/dz$ )が大きいくらい大きい値の粘性抵抗Fを得ることが理解される。

【0018】本発明による粘性抵抗の増加効果は、以下に述べるように、速度勾配( $dV/dz$ )をスリット構造によって増大させることによって達成している。スリット13内の液体は振動面から振動方向への力を受け、振動面に接する液体は振動面と同じ速度で移動する。

【0019】一方、スリット13外の固定部18は構造上静止しているので、この静止面に接する液体の場合には、振動方向と反対方向への力を受け、この部分で液体が強制的に減速させられる。静止面での液体の減速率が十分に大きい場合において、スリット13内での液体の速度勾配は、静止面が無い場合に比べて、即ちスリット構造がない場合に比べてより大きくなることが予想できる。

【0020】これらの結果として、スリット内における液体の速度勾配は増加させられ、その結果、より大きな粘性抵抗が得られる。以上のような原理によりスリット構造を持つ本発明の音叉振動子は大きな粘度精度を有することが期待できる。

【0021】また、図1に示した従来の音叉振動子において、振動子がこのような大きな粘性抵抗を受けるためには、振動子の旋断面積が増加させるか、振幅が増加させるか、振動周波数が増加させるかのいずれかの変化があつて達成されるものと思われるが、本発明では、これ

らの振動形態の変化を必要とすることなく粘度精度の向上ができるという特長を有している。

【0022】本体部16及び固定部18間のスリット13の幅も粘度感度に影響するので重要である。具体的には、スリット内部にある液体の速度分布と位相の状態について考慮することが必要となる。まず、液体の速度分布については、静止液体中に振動面がある場合には、振動面に接する液体は振動面と同方向、同速度で運動し、振動面から離れた位置にある液体は振動面から離れるに従って自己の粘性抵抗によって速度が低下する。次に、液体の位相に関しては、振動面が往復振動している場合には、液体中での運動には振動面から離れるに従って位相遅れも生じてくる。

【0023】この液体中での速度及び位相分布は、一般的なニュートン流体で(K. Keiji Kanazawa及びJoseph G. Gordon (b)氏のAnalytica Chimica Acta, 175巻, 1985年, 99~105頁)によって解析されており、粘性液体中に伝わる振動波の減衰距離を意味する粘性侵入距離が次式のように示されている。

$$\delta = \sqrt{2\eta/\omega\rho}$$

ここで、 $\delta$ は粘性侵入距離、 $\eta$ と $\rho$ は液体の粘度及び密度、 $\omega$ は振動面の角速度で周波数fを用いて表すと $\omega = 2\pi f$ である。粘性侵入距離 $\delta$ は、 $f = 10\text{ KHz}$ 、 $\eta = 10\text{ cP}$ 、 $\rho = 1\text{ g/cc}$ の時に約 $18\mu\text{m}$ となるが、本発明の場合のスリット幅は、 $\delta$ の約10倍以下の大きさであることにより前記粘度感度の向上が大いに期待でき、上記条件の場合では、約0.2mm以下のスリット幅が望ましいと考えられる。

【0024】このようにして作製された音叉振動子の粘度感度の評価は、前記(1)及び(2)式における粘度指数h、jと比例定数a、cによって行うことができ、具体的には以下の(3)及び(4)式のようなf及びVの粘度感度式によって評価できる。ここでは特に $\eta = 1\text{ cP}$ 、 $\rho = 1\text{ g/cc}$ の時の粘度感度ということと簡略化した値になっている。また、形状の異なる音叉振動子の比較を行うときには、空気中で無負荷の時のf、V出力を各々f<sub>air</sub>、V<sub>air</sub>とすると、これらの値で(3)及び(4)式を割った相対粘度感度を用いることで評価できる。

$$(\delta f / \delta \eta) = a \cdot h \quad \dots (3)$$

$$(\delta V / \delta \eta) = c \cdot j \quad \dots (4)$$

【0025】実際の粘度・密度測定に際しては、音叉振動子の各出力が持つ温度特性についても考慮が必要である。まず、共振周波数fは、温度特性が基本的に音叉振動子の形状又は材料特性によって決まり、これらが温度変化によって変化しないことが望ましい。従って、音叉振動子は、具体的に材料の熱膨張係数が重要であり、エリンバー合金、エルコロイ合金、Ni-Span C等の熱膨張係数が0(°C)に近い材料で作製されてい

る。

【0026】次に、音叉振動子を駆動する圧電体の接着方法も重要であり、接着部分の強度、熱歪みなどの機械的特性や、誘電率、絶縁抵抗などの電気的特性などが温度変化によって変化しないような接着材料及び接着方法を選定することも重要である。これらのf温度特性対策を施した上で、さらに僅かに残るf温度特性に関しては、本発明において液体性状センサの近傍に設置せられている温度センサを用いた温度補正処理を行えば、実用上fの温度特性がセンサ出力に与える影響は無視できるほどに小さいものとなる。

【0027】音叉振動子を用いた粘度センサを構成する上で、振動子として図2のような幅が被検液体の粘性侵入距離の約10倍以下である2本のスリットを有する音叉振動子を用い、振動周波数fと音叉振動子の二次側出力電圧の実効値Vとを検出する方式を用いることにより、液体の粘度及び密度が同時に測定可能なセンサとすることができる。

【0028】特に、本発明では、図1に示される従来の音叉振動子に比べると、液体の粘度検出精度が大幅に向上した粘度・密度センサを構成することができる。

【0029】本発明による音叉振動子は図2のような構造をしている。音叉振動子の両腕即ち振動部12には、上記2つのスリット13、13を有し、圧電体14はこのスリットの間に配置せられ、スリットに挟まれた部分を振動させる。圧電体14は、外部からの入力信号により駆動するものと、音叉振動子の振動を外部に出力するためのものの1対が図のように設置されている。本セン

$$f = -1039\eta 0.03\rho 0.71 + 10976 \quad \dots (6)$$

$$V = -0.997\eta 0.27\rho 0.10 + 1.802 \quad \dots (7)$$

【0033】(6)及び(7)式において、(粘度指数値)/(密度指数値)の値と、(3)及び(4)式で表された粘度感度の値について、図1に示されるような通常の音叉振動子の形状の場合での値と比べた結果を次の表1に示す。ここで示されているように、本発明によるスリット音叉の粘度指数値の大きさと粘度感度はどちら

も通常音叉の場合よりも大きな値を有しており、本発明によるスリット音叉の粘度感度は改善されていることがわかる。

【0030】本発明による液体性状センサは、以下のよう評価した。図3は、液体性状センサを用いた粘度、密度の測定システムの概略図である。まず、音叉振動子は振動数が約10KHzのものを図2のような形状で作成した。音叉振動子は以下に述べる数種類の被検液体に入れられ、発振回路により自走発振し、この発振周波数fと音叉振動子の二次側出力電圧の実効値Vを各々周波数カウンタとデジタルマルチメータで測定した。

【0031】被検液体としては、軽油2号と特3号、灯油、プロパノール、トリクレン、フロリナートFC84とFC75の計7種類の液体を測定した。これらの液体の粘度及び密度はあらかじめ別途計測用の粘度計と密度計で測定しておき、さらに、上記の測定時の液体温度によって温度補正した粘度・密度の値を各々の測定時点での被検液体の粘度・密度の値であるとした。

【0032】上記のように、7種類の液体にセンサを入れたときの(f、V)出力を測定し、(f1、 $\eta$ 1、 $\rho$ 1)～(f7、 $\eta$ 7、 $\rho$ 7)と(V1、 $\eta$ 1、 $\rho$ 1)～(V7、 $\eta$ 7、 $\rho$ 7)という形式でf、Vに関して各々7組のデータを採取した。次に、これらのデータより、(1)及び(2)式のような形式で最も相関係数の高い回帰式を求めて各々f、Vに関する特性方程式とした。下式は、このようにして求められた燃料性状センサの特性方程式の一例である。

も通常音叉の場合よりも大きな値を有しており、本発明によるスリット音叉の粘度感度は改善されていることがわかる。

【0034】

【表1】

表1. 通常音叉とスリット音叉の粘度感度の比較

出力	音叉種類	粘度指数値/密度指数値	粘度感度
f特性	通常音叉	0.012	-11.4Hz/cP
	スリット音叉	0.042	-31.2Hz/cP
V特性	通常音叉	1.111	-0.162V/cP
	スリット音叉	2.700	-0.269V/cP

【0035】本発明によるスリット音叉及び通常音叉の粘度・密度測定精度の評価を次のような実験方法により行った。即ち、まず、前記方法により音叉の精度特性を評価し、f( $\eta$ 、 $\rho$ )及びV( $\eta$ 、 $\rho$ )の特性式を決定

した後、この式を用いて、あらためて各種液体の粘度と密度の測定を行った。そして、測定精度としては、別途計測器により測定した粘度及び密度の値を各々の真値とした上で、図中の式にあるような方法で測定精度を算出

した。

【0036】音叉振動子を用いた液体性状センサで、通常音叉と本発明によるスリット音叉の粘度及び密度の測定精度の評価結果を図4及び図5に示す。図中、従来音叉とは通常形状の音叉のことである。図に示されているように、粘度、密度共に、測定精度はスリット音叉を用いることで大幅に改善されていることがわかる。具体的には、粘度測定精度で、約±20%の測定精度であったものが約±5%に改善され、密度測定精度では、約±1%の測定精度であったものが約±0.5%にまで改善されている。これらの測定精度の改善の中で、特に粘度測定精度の改善の程度は非常に大きいことが示されているがこれは、表1に示した粘度感度の改善による結果であったと考えられる。

【0037】

【発明の効果】本発明により作製された粘度・密度センサは、構造が簡単、堅牢で、さらに小型の音叉振動子を用いて作製できることから、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンなどの内燃機関内の狭小空間内にも設置できる。さらには、携帯用の粘度・密度センサ、液体性状センサとしても利用できる。本発明による本体部16の両側にスリットを有する構造の音叉振動子を用いた粘度・

密度センサでは、通常形状の音叉振動子を用いた粘度・密度センサに比べて高い粘度精度を有しており、その結果、粘度測定精度が大幅に向上した粘度・密度センサとして利用できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来の音叉振動子の概略斜視図である。

【図2】本発明による両側スリット構造を有する音叉振動子の概略斜視図である。

【図3】本発明による液体性状センサを用いた粘度密度測定システムの概略図である。

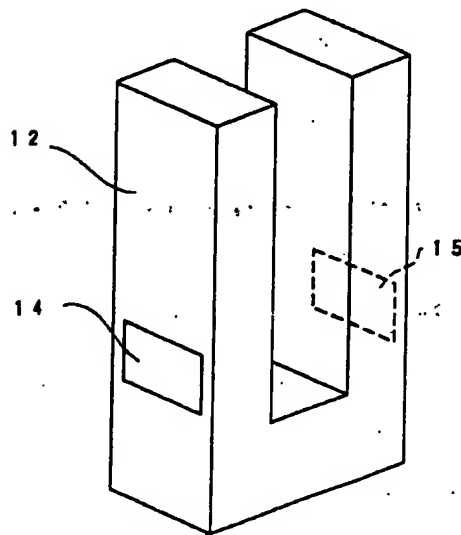
【図4】本発明による液体性状センサの粘度の測定精度を示す図である。

【図5】本発明による液体性状センサの密度の測定精度を示す図である。

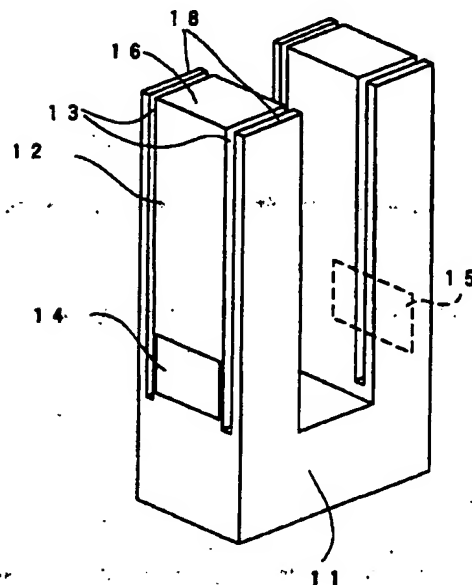
【符号の説明】

- |    |              |
|----|--------------|
| 11 | 基部           |
| 12 | 振動部          |
| 13 | スリット         |
| 14 | 入力側圧電体（圧電素子） |
| 15 | 出力側圧電体       |
| 16 | 本体部          |
| 18 | 固定部          |

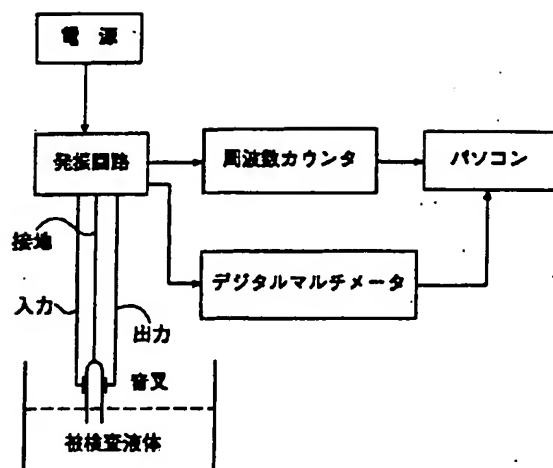
【図1】



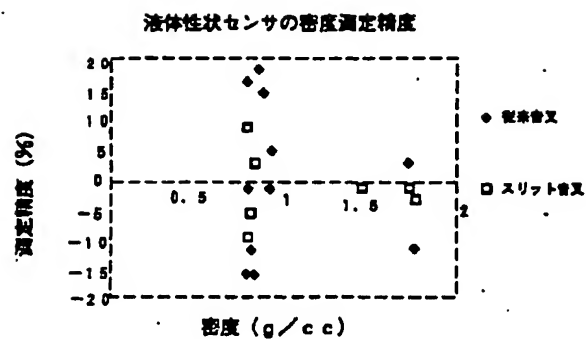
【図2】



【図3】



【図5】



【図4】

